

高精度なタイムキーピングのための ADE71XX/ADE75XX ファミリーRTC の補償

著者 : Meghan Baker、Aileen Ritchie

はじめに

このアプリケーション・ノートでは、ADE71xx/ADE75xx RTC を温度変化に対して 25°C でキャリブレーションし、正確な時間を維持する方法について説明します。リアルタイム・クロック (RTC) ペリフェラルに内蔵されているハードウェア補償について詳しく説明し、温度変化に対する補償を調整するアルゴリズムを提供します。

ADE75xx/ADE71xx は、アナログ・フロント・エンド、アナログ・デバイセズの固定機能 DSP、機能強化された 8052 MCU コア付きの電力計 IC (ADE) を内蔵しています。RTC、LCD ドライバ、ペリフェラルを内蔵することにより、統合電力計ソリューションを構成しています。

デザイン目標

大部分の電力計では、ピーク時使用と非ピーク時使用に対して異なるレートで課金する使用時間課金を採用しています。これらの電力計は 10~20 年間設置されるため、使用時間帯の区別を行う正確なクロックを持つことが不可欠です。

キャリブレーション後、RTC は一定温度に対して 0.5 sec/day の精度を持ち、温度変動に対しては 0.15 sec/day°C の精度を持ちます。このため、RTC の月間誤差は -40°C ~ +85°C の温度範囲で 30 sec を超えることはありません。

動作原理

抵抗やコンデンサなどの他の一般的な電気部品と同様に水晶も、一定の許容偏差を持っています。25°C で 32.768 kHz の公称周波数を持つ水晶は、実際には公称値に対して ±20 ppm の周波数を持ちます。水晶周波数も温度に対して変化します。これらの理由により、正確な時間を維持するためには、水晶周波数の変動を補償できることが重要です。ADE71xx/ADE75xx では、RTC の周期的なハードウェア自動補償機能と内蔵の温度 ADC を使ってこれを容易に実現しています。

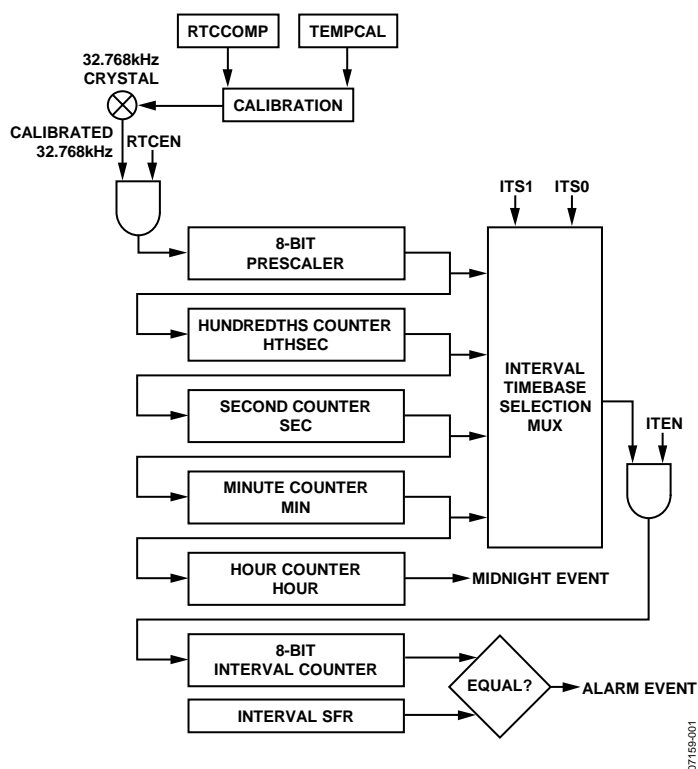


図 1. RTC の構成

目次

はじめに.....	1	実装.....	3
デザイン目標.....	1	補償結果.....	6
動作原理.....	1		

実装

ADE71xx/ADE75xx RTC は、数百秒から数時間までのタイムキーピング・レジスタを内蔵しています(図 1 参照)。ユーザーがソフトウェア・カレンダーを更新できるように、1 日に 1 回割込みが発生します。

ADE71xx/ADE75xx は、周期的なハードウェア自動補償機能を使って 32.768 kHz の入力信号をキャリブレーションします。キャリブレーションは、100 万個のクロック・パルス・ストリームに対してパルスを追加または削除することにより実現されます。これにより、通常モードで 30.5 sec のウィンドウが構成されます。キャリブレーション・モードでは、0.244 sec の短いキャリブレーション・ウィンドウを使うことも可能です。通常モードとキャリブレーション・モードで、補償対象の RTC に比例するパルスが P0.2 に出力されます。このときの周波数オプションを表 1 に示します。

INTPR レジスタは、キャリブレーション用の出力周波数の選択に使います(表 1 参照)。INTPR レジスタ内にある RTCCAL ビットは、キャリブレーション出力をイネーブルします。RTC キャリブレーション出力モードは、通常の使用には推奨できません。詳細については、ADE71xx/ADE75xx データ・シートを参照してください。

表 1.RTC 周波数のオプション

INTPR Register FSEL [1:0]	Calibration Window(sec)	f _{CAL} (Hz)
Normal Mode 0	30.5	1
Normal Mode 1	30.5	512
Calibration Mode 0	0.244	500
Calibration Mode 1	0.244	16,384

公称周波数のキャリブレーションは RTCCOMP スペシャル・ファンクション・レジスタ(SFR)を使って、温度補償の調整は TEMPCAL SFR を使って、それぞれ実行されます。この補償は、2 ppm/LSB、すなわち 0.17 sec/day の分解能で行われます。RTCCOMP SFR と TEMPCAL SFR に対する書き込みにより、最大 248 ppm までの補償を調整することができます。

公称 32 kHz 周波数のキャリブレーション

RTC リファレンスまたは周波数カウンタを使って、周波数出力の誤差を測定します。RTC リファレンスの例(Infotec Electronics 社製の ITP02)を図 2 に示します。このリファレンス電力計は、1 sec、5 sec、または 10 sec の設定可能なゲート時間を使って、f_{CAL} と期待周波数との間の sec/day 誤差を測定します。



図 2.Infotec 製の ITP02 RTC リファレンス

求める補償値は、シングル・パルス周波数出力のパーセント誤差を計算して求めることができます。水晶の誤差を求めた後、キャリブレーション値を内部 RTCCOMP レジスタに書き込みます。ADE71xx/ADE75xx は、RTCCOMP レジスタに書き込まれた値を使って RTC 周波数を自動的に補償します。この補償は、RTC モードで指定された時間ウィンドウ内で実行されます(表 1 参照)。通常モードでは、このウィンドウは 30.5 sec です。

求める RTC 調整値は、ファームウェア内で発生された出力パルスから決定されます。RTC キャリブレーション・パルスは P0.2 に出力されます。この出力パルスから、周波数のパーセント誤差が求められ、補償係数が計算されます。RTCCOMP レジスタは、2 ppm/LSB で補正值を表します。ここで、1 sec/day は 11.57 ppm に該当します。

$$RTCCOMP = \frac{1}{2 \times 11.57} \times (\text{sec/day error})$$

$$RTCCOMP = 5000 \times (\% \text{ error})$$

キャリブレーションが通常モードで実行され、実際の RTC キャリブレーション・パルスが 1.000063 Hz であるとする、RTCCOMP 値は次のように計算されます。

$$RTCCOMP = \frac{1 \text{ Hz}_{\text{actual}} - 1 \text{ Hz}}{1 \text{ Hz}} \times 5000$$

$$RTCCOMP = \frac{1.000063 \text{ Hz} - 1 \text{ Hz}}{1 \text{ Hz}} \times 5000 = -31$$

RTCCOMP レジスタまたは TEMPCAL レジスタを非ゼロ値に調整した後にキャリブレーションを確認するときは、キャリブレーションをキャリブレーション・ウィンドウ内で確認する必要があります。これは、RTC リファレンスまたは周波数カウンタのゲート時間を、周波数出力モードに応じて、30 sec または 0.244 sec の倍数に設定する必要があることを意味します。あるいは、30 sec のゲート時間が使用できない場合、10 sec ゲートによる 3 回の誤差計測から平均を求めて最終誤差を決めることができます。

水晶温度変動の測定

水晶の温度変動は結晶の物理により支配され、図 3 に示す放物線になります。この動作補償に温度補償を適用しない場合、RTC は屋外環境ですぐ精度を失ってしまいます。

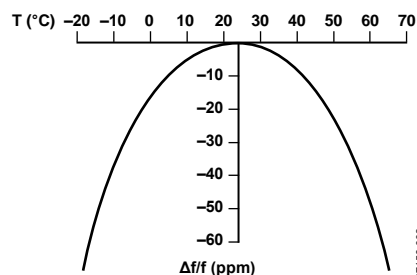


図 3.水晶の温度放物線

この曲線は一般に、変曲点(T_0)と曲率(k)を使って水晶メーカーが提供します。周波数変動は、これらパラメータの関数として式 1 のように表されます。

$$f - f_0 = -k \times (T - T_0)^2 \quad (1)$$

曲率 k は水晶の機械的な特性に固有であり、メーカーごとに異なります。製造時の温度キャリブレーションは好ましくないため、曲率をデザインで固定する必要があります。水晶のデータ・シートでは、曲率(typ)を規定しています。誤差が許容できる場合、この値を使うことができます。あるいは、複数の電力計について、周波数出力変化をテストすることにより、このパラメータを実験的に決定することもできます。

水晶の係数を求めたら、電力計の温度に基づいて適切な補正を加えるアルゴリズムを制定します。ADE71xx/ADE75xx に内蔵の温度 ADC を使うと、温度値を容易に読み出すことができます。

ADE71xx/ADE75xx の温度 ADC

ADE71xx/ADE75xx 温度 ADC は、LSB あたり 0.78°C と正確です。ADE71xx/ADE75xx は、温度計測値を取得する 2 つの方法を提供します。1 つ目の方法では、温度計測を要求するとレジスタから読み出されます。2 つ目の方法では、バックグラウンドで温度計測が行われているため、温度変化がユーザー指定のスレッシュホールドを超えると、割り込みが発生します。たとえば、温度 ADC が 1 LSB 以上変化すると(0.78°C 単位で変化)、割り込みが発生します。これは、ユーザー・コードから温度を追跡する際に、目立たないように実行できる方法を提供します。温度 ADC の計測については、ADE71xx/ADE75xx のデータ・シートを参照してください。

温度補償アルゴリズム

温度補償を実行する最も容易な方法は、温度 ADC の変換結果が変化したとき $TEMPCOMP$ SFR を更新する方法です。ADE71xx/ADE75xx の参考デザインで使用した水晶は、 $-0.0306 \text{ ppm}/^\circ\text{C}^2$ の曲率と 25°C の変曲点を持っています。これから、 $TEMPADC$ コードと該当する $TEMPCOMP$ との関係性を求めて、式 2 を導出します。

式 1 とこの水晶の固有な特性から、水晶周波数の変化が温度の関数として得られます。

$$\Delta f = -0.0306 \text{ ppm} \times (\Delta T)^2$$

ADE71xx/ADE75xx の $TEMPADC$ は $0.78^\circ\text{C}/\text{LSB}$ の分解能を持ちます。

$$\Delta T = 0.78^\circ\text{C}/\text{LSB} \times TEMPADC$$

これを代入すると、 $TEMPADC$ レジスタの関数としての水晶周波数の変化は次のように表されます。

$$\Delta f = -0.0306 \text{ ppm} \times (0.78)^2 (\Delta TEMPADC)^2$$

$TEMPCOMP$ レジスタにより与えられる RTC 補償値は $2 \text{ ppm}/\text{LSB}$ の重みを持つため、

$$\Delta TEMPCOMP = \frac{-0.0306 \text{ ppm}}{-2} \times (0.78)^2 (\Delta TEMPADC)^2$$

$$\Delta TEMPCOMP = 0.0093 \times (\Delta TEMPADC)^2 \quad (2)$$

式 2 を式 3 のように整理すると、8052 コア・プロセッサに必要とされる簡素化された式が得られます。

$$\Delta TEMPCOMP = 38 \times 2^{-12} \times (\Delta TEMPADC)^2 \quad (3)$$

この式から、2 回の 8×8 乗算と複数のシフトが必要なことが分かります。ただし、8052 コアには乗算命令があるため、コードまたは時間を多く要することはありません。

あるいは、簡単なルックアップ・テーブルを使用して補償を実現することもできます。水晶周波数の変化は放物線であり、 y 軸に関して対称であるため、補償値の半分を保存するだけで済みます。このようにして得たルックアップ・テーブルを表 2 に示します。温度 ADC を読み出し、 25°C での値 139 を減算することにより、インデックスとそれによる補償値を求めることができます。たとえば、 70°C で $TEMPADC$ 値は 207 であるため、インデックスは $207 - 139 = 68$ と計算されます。したがって、求める $TEMPCOMP$ 値は 70°C で 37 になります。水晶の温度応答は対称であるため、インデックスはその温度での ADC 測定値と 25°C での ADC 測定値との差の絶対値として定めることができます。

$$Table\ Index = \left| TEMPADC - TEMPADC_{25^\circ C} \right|$$

表 2.RTC の温度補償ルックアップ・テーブル

Index	Temp (°C)	TEMPADC Code	TEMPCOMP Value
0	25.12863	139	0
1	25.79268	140	0
2	26.45674	141	0
3	27.12079	142	0
4	27.78485	143	0
5	28.4489	144	0
6	29.11296	145	0
7	29.77701	146	0
8	30.44107	147	0
9	31.10512	148	1
10	31.76917	149	1
11	32.43323	150	1
12	33.09728	151	1
13	33.76134	152	1
14	34.42539	153	1
15	35.08945	154	2
16	35.7535	155	2
17	36.41756	156	2
18	37.08161	157	2
19	37.74567	158	3
20	38.40972	159	3
21	39.07378	160	3
22	39.73783	161	4
23	40.40189	162	4
24	41.06594	163	4
25	41.73	164	5
26	42.39405	165	5
27	43.0581	166	5
28	43.72216	167	6
29	44.38621	168	6
30	45.05027	169	7
31	45.71432	170	7
32	46.37838	171	8
33	47.04243	172	8
34	47.70649	173	9
35	48.37054	174	9
36	49.0346	175	10
37	49.69865	176	10
38	50.36271	177	11
39	51.02676	178	11
40	51.69082	179	12
41	52.35487	180	13
42	53.01893	181	13
43	53.68298	182	14
44	54.34703	183	15
45	55.01109	184	15

Index	Temp (°C)	TEMPADC Code	TEMPCOMP Value
46	55.67514	185	16
47	56.3392	186	17
48	57.00325	187	17
49	57.66731	188	18
50	58.33136	189	19
51	58.99542	190	20
52	59.65947	191	20
53	60.32353	192	21
54	60.98758	193	22
55	61.65164	194	23
56	62.31569	195	24
57	62.97975	196	24
58	63.6438	197	25
59	64.30786	198	26
60	64.97191	199	27
61	65.63597	200	28
62	66.30002	201	29
63	66.96407	202	30
64	67.62813	203	31
65	68.29218	204	32
66	68.95624	205	33
67	69.62029	206	34
68	70.28435	207	35
69	70.9484	208	36
70	71.61246	209	37
71	72.27651	210	38
72	72.94057	211	39
73	73.60462	212	40
74	74.26868	213	41
75	74.93273	214	42
76	75.59679	215	44
77	76.26084	216	45
78	76.9249	217	46
79	77.58895	218	47
80	78.253	219	48
81	78.91706	220	49
82	79.58111	221	51
83	80.24517	222	52
84	80.90922	223	53
85	81.57328	224	54
86	82.23733	225	56
87	82.90139	226	57
88	83.56544	227	58
89	84.2295	228	60
90	84.89355	229	61
91	85.55761	230	62

補償結果

公称水晶周波数は、0.5 sec/day のデザイン目標に対して、0.17 sec/day (2 ppm)以内にキャリブレーションされました。表 2 を使用すると、0.085 sec/day°Cの対温度ワーストケース誤差が得られます。温度に対してキャリブレーションされた誤差を図 5 に示します。表 2 と直接計算による方法は、同じ誤差を得ており、目標の 0.15 sec/day を満たしています。対温度水晶変動の部品間の変動により、図 5 に示す補償プロットで誤差が少し増えています。

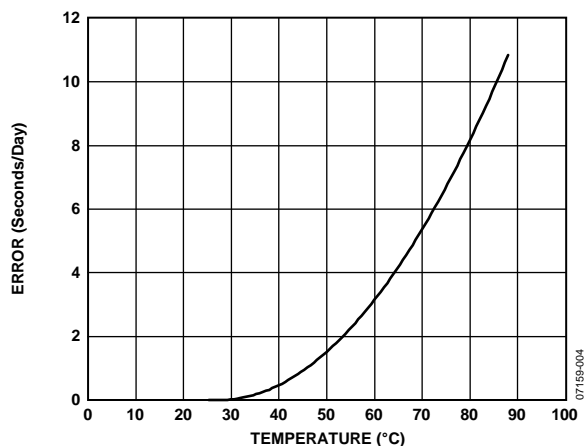


図 4.温度補償がない場合の sec/day 誤差

温度補償がない場合、10 sec/day の誤差が 85°Cで発生します(図 4 参照)。これは、 $10 \text{ sec/day} / (85^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 0.167 \text{ sec/day}^\circ\text{C}$ であるため、デザイン目標の $0.15 \text{ sec/day}^\circ\text{C}$ に近い値です。ただし、温度補償を行わない電力計は、屋外環境で 30 sec/month の全体仕様を容易に満たさなくなってしまう。

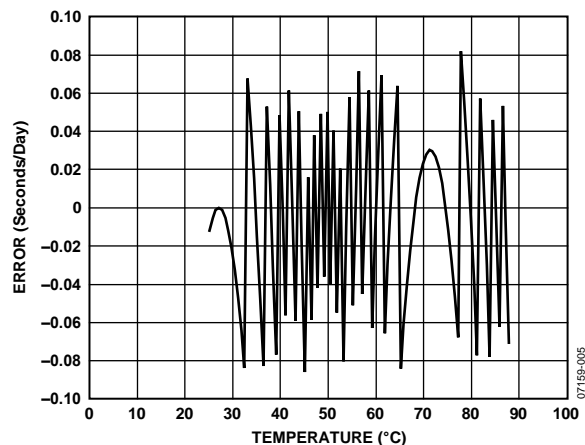


図 5.温度補償した場合の sec/day 誤差